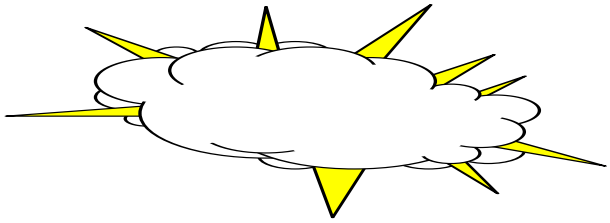
christophe.alleau@ac-poitiers.fr

La vapeur d'eau

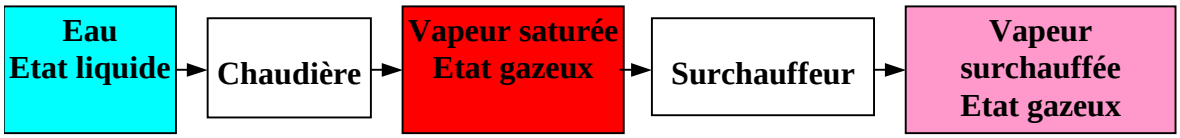
I.Importance de la vapeur

Dans les procédés industriels, la vapeur d'eau est un fluide énergétique très utilisé dés qu'il s'agit de chauffer. On la retrouve dans les activités tel que :

- la pétrochimie,
- la chimie,
- l'agro-alimentaire,
- les industries de transformation,
- le chauffage urbain, etc...



Injectée dans une centrale de traitement de l'air, la vapeur sert à maintenir l'humidité dans des locaux. Surchauffée puis détendue dans des turbines, la vapeur peut également servir à la production d'électricité.



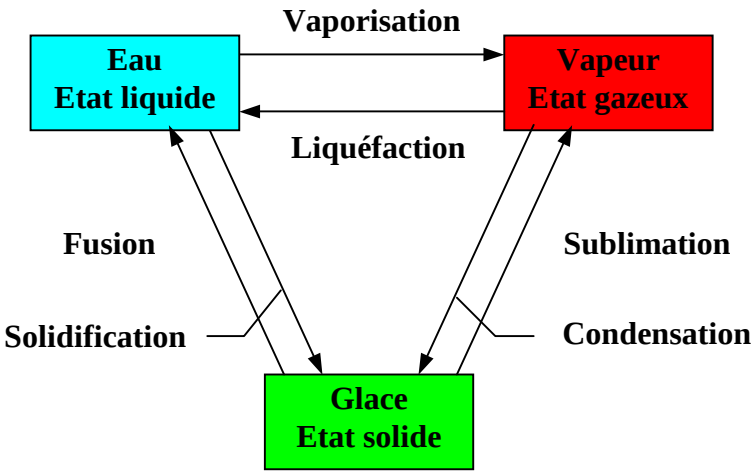
Si tant d'industriels ont choisi et continuent de choisir la vapeur d'eau, c'est parce que ce fluide a des propriétés physiques particulièrement adaptées au transfert de chaleur. Par exemple, sa chaleur latente élevée permet d'obtenir un bon rendement thermique dans les échangeurs de chaleur ou encore la relation précise entre sa pression et sa température à l'état saturé autorise un bon contrôle de l'état du fluide.

La vapeur d'eau est de l'eau à l'état gazeux !

II.Propriétés thermiques de l'eau

A.Généralités

Chaque changement d'état nécessite un transfert d'énergie qui modifie les forces de liaison entre les molécules. La quantité d'énergie nécessaire à un changement d'état s'appelle **chaleur latente** de **changement d'état**, que l'on différencie de la **chaleur sensible** qui ne provoque qu'une variation de température du corps **sans en changer l'état physique**.



A une pression donnée, chaque changement d'état s'accompagne d'une variation de volume ; cette variation peut être très importante lors des transformations liquide <=> gaz.

Notons que l'eau, l'argent, le bismuth et la fonte de fer sont les rares corps dont le volume augmente lors de la solidification (ce qui explique que des canalisations ne résistent pas au gel) ; ainsi l'eau se dilate en se congelant. A 0 °C, sa masse volumique est de 916,8 kg/m³ alors qu'à l'état liquide elle est de 1000 kg/m³. Cette dilatation, de l'ordre de 10 % est à l'origine de nombreux dégâts dans les réseaux vapeur/condensat soumis au gel.

Les propriétés physiques de la vapeur sont caractérisées par des grandeurs (pression, température, chaleur, volume massique ou encore masse volumique). A chaque grandeur est associée une unité. Nous utiliserons autant que possible les unités du système international (S.I.).

Pression relative = Pression Absolue - Pression atmosphérique
avec Pression atmosphérique = 1,013 bar absolue.

B.Relation pression / température

La température de vaporisation de l'eau augmente lorsque la pression augmente. Cette relation est rigoureusement précise et immédiate à condition d'avoir des valeurs de pression et température inférieures à celle du point critique (222,2 bar, 374,15 °C).

Ainsi sous une pression de 1 bar, on a une température d'ébullition de 100 °C. On peut, à l'aide de la table (voir page 13), lire que pour une pression de 10 bar, la température d'ébullition est de 179 °C.

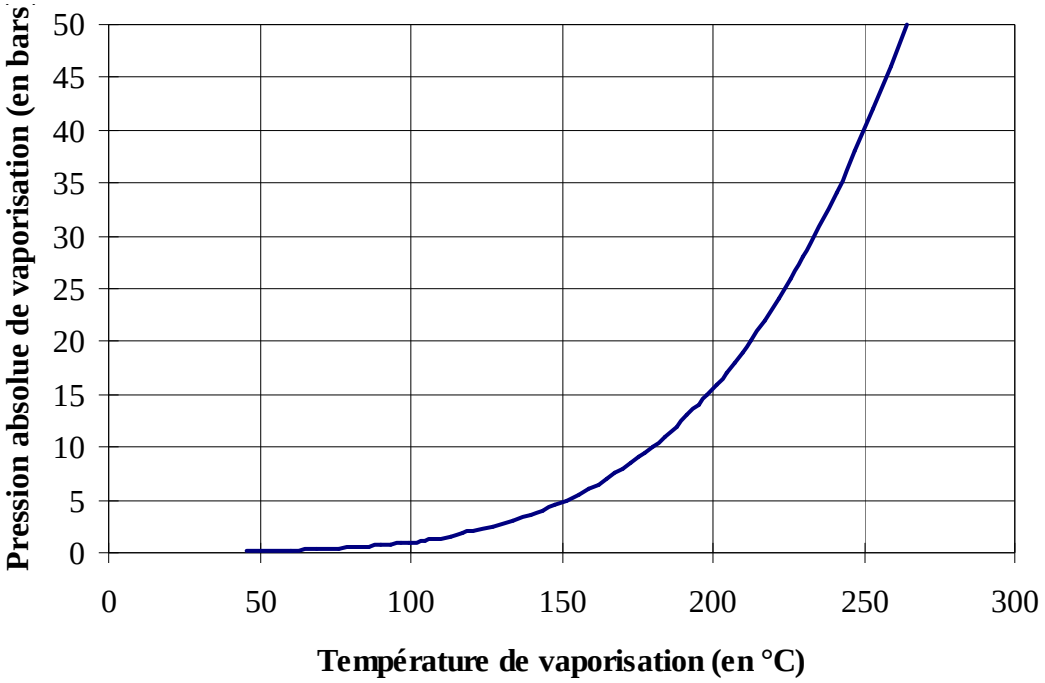


Figure 1 Courbe de vaporisation de l'eau

1.Formule de Duperray

Ainsi, à l'aide de la formule de Duperray, on peut estimer la valeur de la pression de vaporisation en fonction de la température pour une pression comprise entre 1 et 40 bar :

$$P_S = \left(\frac{T_S}{100}\right)^4$$

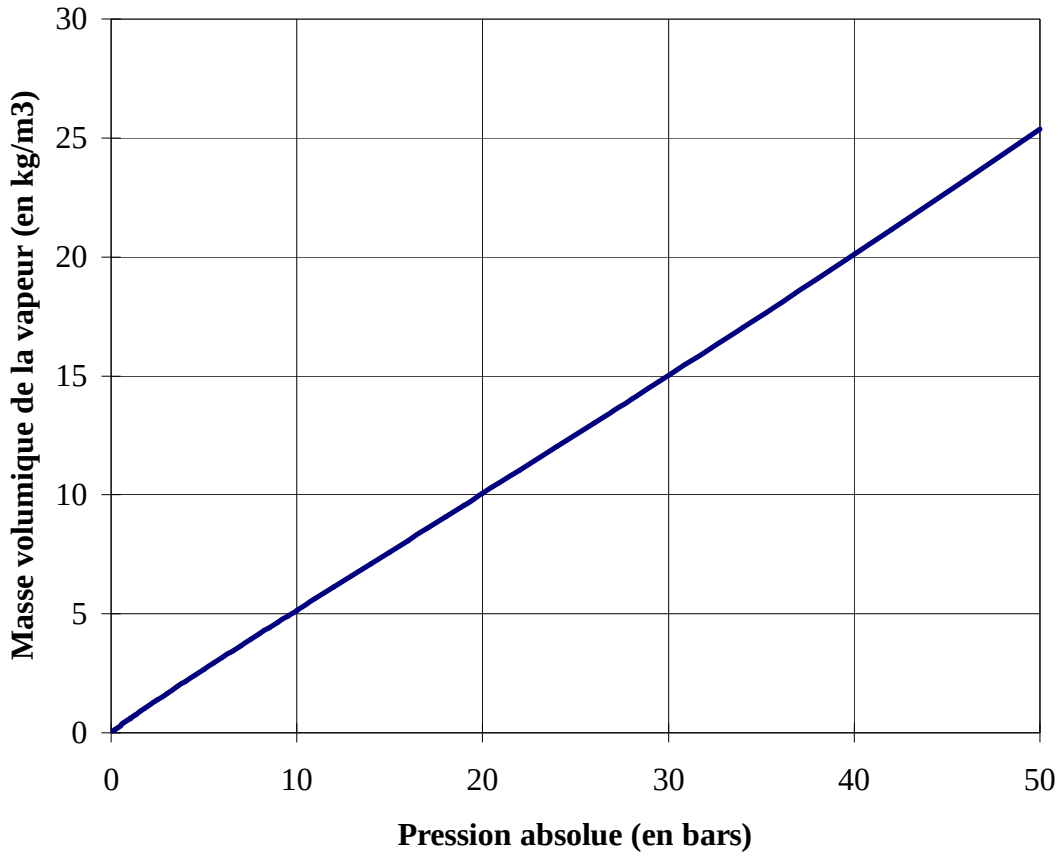
où :

- P_S est la pression absolue en bar,
- T_S la température en °C.

Par exemple, sous une pression absolue de 20 bar, la température d'ébullition est de 211 °C. A l'aide de la table (voir page 13), on peut lire que la température réelle d'ébullition est de 212 °C soit une erreur avec la formule de Duperray inférieure à 0,50 % sur la détermination de la température.

2.Masse volumique de la vapeur

a)Cas de la vapeur saturée



Entre 5 et 80 bar, la formule de Bertin permet d'estimer la masse volumique de la vapeur d'eau saturée.

$$\rho_S \approx \frac{P_S}{2}$$

où :

- P_S : pression absolue en bar,
- ρ_S : masse volumique de la vapeur saturée en kg/m^3.

Pour la pression de 20 bar, on calcule que la masse volumique est de 10 kg/m^3. Avec la table (voir page 13), on trouve aussi 10 kg/m^3 !

b)Cas de la vapeur surchauffée

Une valeur approchée peut être obtenue à l'aide de la formule de Callendar :

$$\rho = \rho_S \frac{1}{1 + 0{,}00252(T - T_S)}$$

où :

- ρ : la masse volumique de la vapeur surchauffée en kg/m^3,
- ρ_S :masse volumique de la vapeur saturée en kg/m^3 à la pression considérée,
- T : température de la vapeur surchauffée en K ou °C ;
- T_S : température de vaporisation en K ou °C.

3.Application

On a de la vapeur à une température T de 225°C et une pression absolue de 10 bar.

a)Type de vapeur

Pour cette pression, la température T_S correspondant à celle de la vapeur saturée est donnée par la formule de Dupperay soit une température de 177°C donc la température mesurée T étant supérieure, on en déduit qu'il s'agit de vapeur surchauffée.

b)Caractéristique de la vapeur saturée

A l'aide de la formule de Bertin, on calcule la valeur de la masse volumique ρ_S de la vapeur saturée à cette pression, soit 5,00 kg/m^3.

c)Masse volumique de la vapeur surchauffée

A l'aide de la formule de Callendar, on calcule alors la valeur de la masse volumique ρ de la vapeur surchauffée à cette pression, soit 4,49 kg/m^3. La valeur expérimentale étant de 4,55 kg/m^3. On peut donc considérer que ces formules permettent d'obtenir des résultats satisfaisants.

4.Volume massique

Le volume massique est l'inverse de la masse volumique. La vapeur est un gaz, elle est donc compressible. Plus la pression augmente, plus le volume massique diminue. Ainsi à 10 bar le volume occupé par une certaine masse de vapeur est approximativement 10 fois plus petit qu'à 1 bar ; donc pour véhiculer la même masse de vapeur une section de tuyauterie 10 fois plus petite sera suffisante.

C.Pouvoir de dissolubilité

L'eau pure (H_20), pratiquement inexistante sur terre, est un solvant redoutable. En traversant les couches géologiques, elle se chargera de nombreux matériaux dissous. Les plus abondants sont : les sels de calcium, de magnésium, la silice, le fer le cuivre. Plus elle sera chargée de solides dissous, moins elle sera agressive.

Elle absorbera également des gaz :

- le dioxyde de carbone (CO_2), qui est très soluble dans l'eau,
- l'oxygène (O_2),
- l'azote (N_2), etc..

Tous ces corps étrangers contenus dans l'eau auront des effets plus ou moins néfastes sur une installation de vapeur.

D.Vaporisation à la pression atmosphérique

1.Chaleur massique isobare

Par définition, la chaleur massique isobare (en J/kg/K), notée c_P, appelée aussi chaleur spécifique, est l'énergie qu'il faut fournir à une masse M d'un corps pour élever sa température de 1,00 °C lorsque la pression est constante. Par ailleurs, la capacité calorifique (en J/K) est la quantité de chaleur reçue ou fournie à une masse de 1,00 kg d'un corps pour élever sa température de 1,00 °C.

A une variation de 1,00 K correspond une variation de 1,00 °C

Ainsi pour de l'eau à la pression atmosphérique, on lit dans le tableau (voir page 13) que sa chaleur massique isobare est de 4,19 kJ/kg/K alors qu'elle est de 4,23 kJ/kg/K sous 10 bar.

c_P = chaleur massique isobare

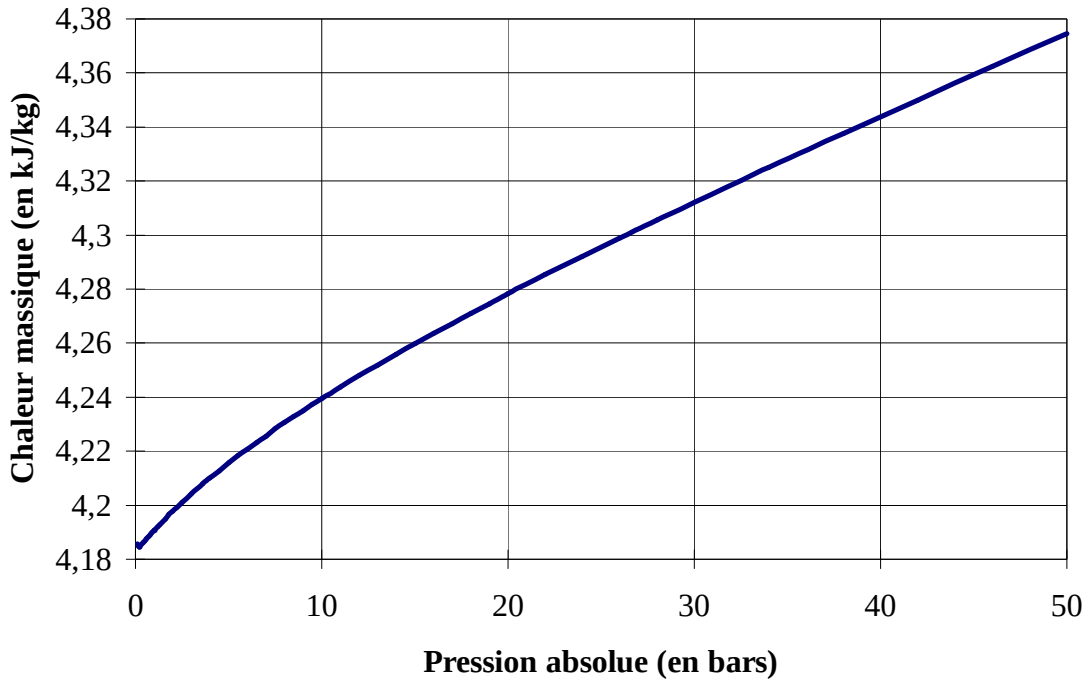


Figure 2 Evolution de la chaleur massique isobare de l'eau en fonction de la pression

Comparée aux autres corps, l'eau possède une chaleur spécifique élevée ; celle-ci est environ le double de celle d'un alliage comme l'acier au carbone.

Plus la pression augmente, plus la chaleur massique isobare augmente.

D'une manière générale, la quantité de chaleur absorbée par un corps soumis à une élévation de température (sans changement d'état) peut s'écrire :

$$Q = mc_p(\theta_f - \theta_i)$$

où :

- Q est l'énergie reçue (Q>0) ou cédée (Q<0) par le corps (en J),
- m est la masse de ce corps (en kg),
- c_P est la chaleur massique à la pression P (en kJ/kg/°C),
- θ_f est la température finale de ce corps (en K ou °C),
- θ_i est la température initiale de ce corps (en K ou °C).

1 Calorie = 4,19 Joules

Les chaudières et la plupart des appareils de production de vapeur fonctionnent à pression constante (en général, à la pression atmosphérique). Il est alors commode d'utiliser l'enthalpie comme énergie pour la vapeur d'eau.

On choisit donc pour la mesure des énergies, la température de 0 °C. Toutes les enthalpies sont donc des différences d'énergie entre l'enthalpie dans un état (T,P) et celle à 0 °C pour la pression P.

Ainsi une masse de 1,00 kg d'eau liquide contenue dans un récipient à la pression atmosphérique à 20 °C possède 83,8 kJ d'enthalpie. Si l'on chauffe cette eau, on constate que sa température s'élève jusqu'à 100 °C. Ce kilogramme d'eau, à l'état liquide, possède alors une énergie de 419,0 kJ par rapport à 0 °C, appelée enthalpie ou encore chaleur sensible. Donc pour élever sa température de 20 °C à 100 °C à la pression atmosphérique, il faut lui fournir une énergie de 335 kJ.

Le passage de la température d'une eau à l'état liquide de 0 à 100 °C nécessite donc l'apport de 419,0 kJ/kg d'eau. Pour chaque degré d'élévation de température, il faut fournir en moyenne 4,19 kJ/kg.

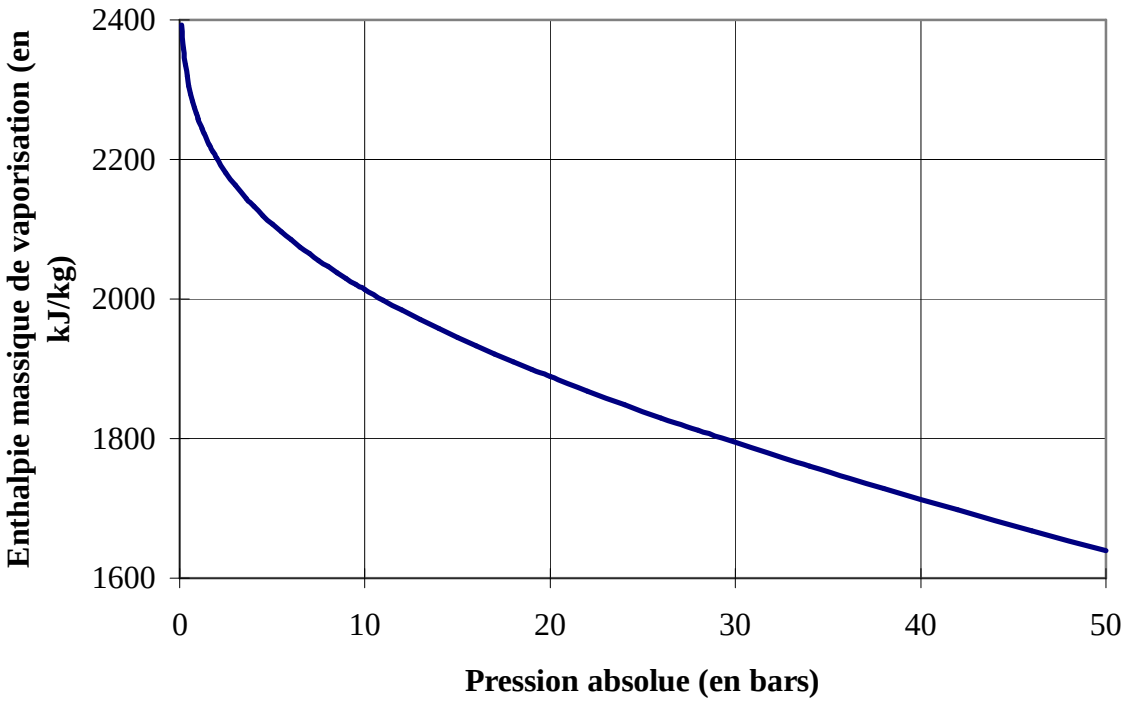
La variation d'énergie contenue dans l'eau est donc proportionnelle à la variation de température. Cette énergie s'appelle l'enthalpie de l'eau, elle est mesurable par la pesée du corps multipliée par sa chaleur massique isobare et sa température.

2.Enthalpie de vaporisation

Si l'on continue à chauffer notre masse d'eau à 100 °C sous la pression atmosphérique, on constate que sa température reste constante et égale à 100°C. Les premières fumerolles de vapeur apparaissent jusqu'à la disparition totale de l'eau à l'état liquide.

La transformation du kilogramme d'eau liquide en gaz ou vapeur d'eau, appelée vaporisation, nécessite une quantité importante d'énergie appelée chaleur latente de vaporisation ou enthalpie de vaporisation.

Figure 3 Evolution de l'enthalpie de vaporisation en fonction de la pression



Le phénomène est réversible et la transformation de vapeur en eau, appelée liquéfaction, ne se fera qu'à condition de transmettre l'enthalpie de vaporisation à un autre corps qui se réchauffera. C'est le phénomène qui se produit dans tous les corps de chauffe utilisant la vapeur. La chaleur qui a été absorbée lors de la vaporisation (2257,0 kJ/kg à la pression atmosphérique) est entièrement transférée dans le corps de chauffe vers le corps ou le produit à réchauffer, comme par exemple dans un échangeur thermique. On constate que la changement d'état est un phénomène très 'gourmand' en énergie.

Plus la pression augmente, moins il faut fournir d'énergie pour procéder à une vaporisation.

Il ne peut y avoir transfert thermique et donc réchauffage, que si la vapeur cède sa chaleur latente. Dans les tables de la vapeur (voir page 13), on trouve la chaleur latente ou enthalpie latente de vaporisation.

La transformation de la vapeur s'effectue à température constante. Elle exige environ 5 fois plus d'énergie pour être vaporisée que pour élever la température de 0 à 100°C.

3.Enthalpie totale

L'enthalpie totale de la vapeur d'eau est l'énergie nécessaire pour vaporiser une masse d'eau de 0 °C à sa température de vaporisation. Elle est la somme de l'énergie nécessaire pour la faire passer à l'état liquide de 0 °C à sa température de vaporisation pour une pression donnée et de son enthalpie de vaporisation.

Ainsi pour transformer, sous la pression atmosphérique, une masse de 1 kg d'eau pris à 20 °C en vapeur, l'énergie à fournir est égale à l'énergie fournie pour passer de 20 °C à 100 °C à

l'état liquide soit 334 kJ puis à celle requise lors de la vaporisation à 100 °C soit 2256 kJ donc au total 2590 kJ.

E.Vaporisation sous une pression quelconque

1.Chaleur massique isobare

Par exemple, sous une pression de 11 bar, la température de vaporisation est de 184,13 °C au lieu de 100 °C à la pression atmosphérique. La chaleur massique augmente dans les mêmes proportions, elle est donc égale à 7,816 kJ/kg/°C.

Ainsi pour chauffer une masse de 1 kg d'eau de 20 °C à 100 °C sous cette pression, il faut lui fournir une énergie de 625 kJ ce qui est nettement supérieure à l'énergie nécessaire à la pression atmosphérique (334 kJ).

Plus la pression augmente, plus l'énergie requise pour élever la température de l'eau de la même variation de température est importante.

2.Enthalpie de vaporisation

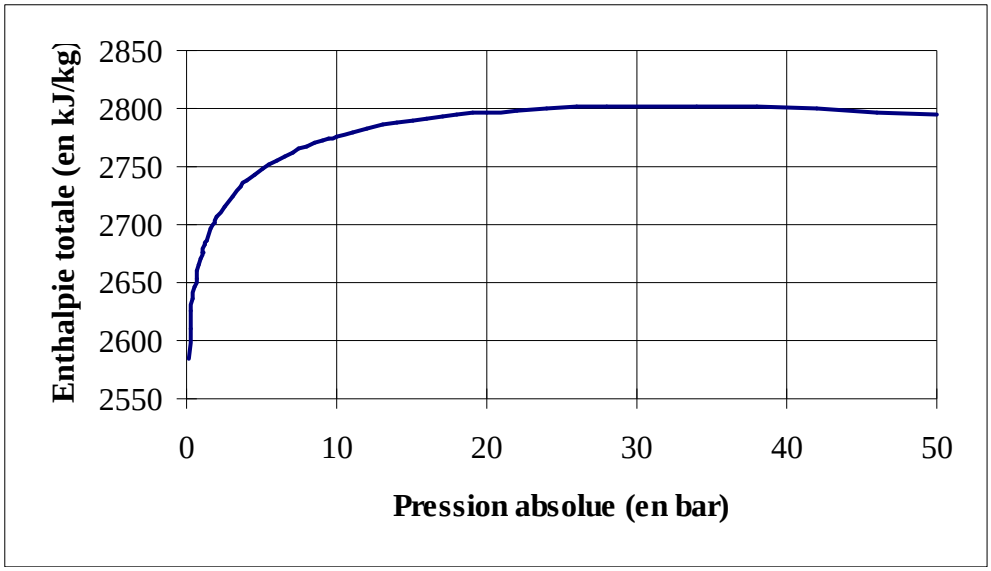
A 11 bar elle n'est que de 1998,5 kJ/kg au lieu de 2257,9 kJ/kg sous 1 bar soit 259,4 kJ/kg de moins.

L'enthalpie de vaporisation dite encore chaleur latente est l'énergie qui permet de changer d'état à température constante. C'est en se liquéfiant que la vapeur cède sa chaleur latente.

3.Enthalpie totale

Plus la pression augmente, plus l'enthalpie totale s'élève, jusqu'à 33 bar relatifs ; au-delà, elle diminue.

Figure 4 Evolution de l'enthalpie totale en fonction de la pression



III.Le titre de la vapeur saturée

A.Définition

Le titre permet d'exprimer le taux d'humidité de la vapeur saturée. Nous verrons plus tard que de l'eau à l'état de fines gouttelettes peut être entraînée dans le courant de vapeur à la sortie de la chaudière. Plus la vapeur saturée sera humide, moins elle sera intéressante d'un point de vue énergétique. D'autre part, l'eau contenue dans la vapeur saturée aura des effets destructeurs sur l'installation. Le titre (noté X) est donc défini de la manière suivante :

$$X = \frac{\text{Masse Vapeur Sèche}}{\text{Masse Vapeur Sèche + Masse Eau en Phase Liquide}}.$$

Le titre est donc toujours compris entre 0 et 1.

La vapeur saturée est dite humide quand son titre est inférieur à 1. Une vapeur saturée humide contient moins de enthalpie qu'une vapeur saturée sèche. Parce qu'une vapeur dont le titre est de 0,95 contient 5,0 % d'eau, elle ne contiendra pas toute l'enthalpie indiquée dans la table de la vapeur saturée, mais seulement 95 %. Une vapeur saturée humide transporte et cède moins de chaleur qu'une vapeur saturée sèche.

B.La vapeur de revaporisation

La vapeur de revaporisation apparaît lors d'une chute de pression du condensat. Ce phénomène est visible à la sortie d'un purgeur quand celui-ci évacue le condensat à l'air libre. Nous avons vu qu'à une pression donnée, l'enthalpie du condensat est connue ; c'est le maximum enthalpique que peut contenir le condensat.

Regardons ce qui se passe lorsque le condensat saturé (en ébullition) passe de 10 bar à 1 bar. L'enthalpie maximale contenue dans le condensat à 1 bar (419,0 kJ) est inférieure à l'enthalpie de l'eau liquide contenue dans le condensat à 11 bar (762,6 kJ/kg). Il y a donc un surplus d'enthalpie, donc d'énergie, égal à 343,6 kJ/kg.

Comme "rien ne se perd, rien ne se crée mais tout se transforme", ce surplus d'énergie sous forme de chaleur ne peut rester inerte. L'échange qui va 'consommer' cette énergie va se produire dans le fluide pour générer un changement d'état partiel du condensat en vapeur, à la pression atmosphérique ; on a donc coexistence d'eau à l'état liquide et vapeur.

On définit donc un taux de revaporisation (ou pourcentage de revaporisation %) qui dépendra de l'enthalpie de vaporisation à 1 bar.

$$\text{Revaporisation de 10 à 1 bar} = \frac{(762,6 - 419,0) * 100}{2257,9} = 15,21\,\%$$

D'une manière générale, un pourcentage de revaporisation (%) lors d'une chute de pression de P_1 à P_2 du condensat s'écrit :

$$\text{Revaporisation de } P_1 \text{ à } P_2\ \% = \frac{\text{Enthalpie de l'eau liquide à } P_1 \text{ - Enthalpie de l'eau liquide à } P_2}{\text{Enthalpie de vaporisation à } P_2}$$

La vapeur de revaporisation est parfois appelée vapeur de flash (de l'anglais "flash steam"). Elle est présente à chaque écoulement de purgeur et est souvent réutilisable à l'aide d'un sépa-

rateur de phases appelé vase de revaporisation. Non utilisée, elle provoquera des nuisances importantes, soit sur les structures et bâtiments de l'usine si elle s'échappe dans l'atmosphère, soit dans les réseaux de retour de condensats où elle occupera une place importante.

La perte d'énergie générée par la dispersion de cette vapeur de revaporisation dans l'atmosphère est à ce point importante qu'elle justifie la plupart du temps l'investissement nécessaire à sa réutilisation.

IV.La vapeur surchauffée

A.C'est quoi ?

Elle est obtenue à partir de vapeur saturante plus ou moins sèche que l'on chauffe dans un corps de chauffe qui n'est pas en contact avec l'eau de la chaudière (surchauffeur). On obtient alors un gaz parfait ou presque. Il n'y a plus de relation entre la pression et la température. La chaleur nécessaire qui a surchauffé cette vapeur s'appelle la chaleur de surchauffe. Il faut environ 2,09 kJ (0,5 kcal) pour élever de 1 °C une masse de 1 kg de vapeur à pression constante. Cette vapeur ne peut pas contenir de gouttelettes d'eau, son titre est de 1.

La vapeur surchauffée aura un coefficient de transfert de chaleur équivalent à celui d'un gaz, très inférieur à celui de la vapeur saturante, ce qui en fait un mauvais fluide de transfert thermique. Elle n'est donc généralement pas utilisée dans les corps de chauffe pour des échanges de chaleur.

Le coefficient global d'échange thermique utilisé par les constructeurs d'échangeurs vapeur/eau est compris entre 2,9 et 2,3 kW/m²/°C alors qu'il est de 0,23 à 0,17 kW/m²/°C pour de la vapeur surchauffée (convection forcée).

B.Utilisations

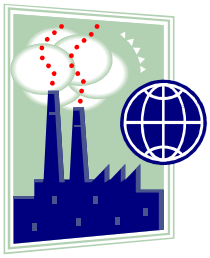
On utilisera donc de la vapeur surchauffée dans les applications suivantes :

Turbines	Toutes les gouttelettes d'eau injectées dans une turbine créent des érosions donc, en étant à une température nettement supérieure à celle de liquéfaction, on limite au maximum le risque d'apparition de ces gouttelettes. De plus, la détente, se produisant à l'intérieur des turbines, fournit un travail et absorbe de la chaleur. La surchauffe garantit donc l'absence d'eau et augmente le rendement de la turbine.
Transport de vapeur	Puisque le coefficient de transfert de chaleur est médiocre, on réduira les pertes calorifiques du réseau de distribution avec l'air ambiant, ce qui abaissera le taux de condensation et le nombre de purgeurs en ligne.

La vapeur de ‘dispersion’ ou de ‘fluidisation’ doit presque toujours être parfaitement sèche et ne pas se condenser.

Procédés industriels

Si, dans un cycle couramment utilisé, la vapeur après détente dans une turbine, alimente un échangeur de chaleur, on désurchauffera la vapeur en injectant de l'eau qui pour se vaporiser empruntera l’enthalpie de surchauffe. Cette injection se fera à l'aide d'un désurchauffeur dont le débit d'eau sera fonction de la température de la vapeur partiellement désurchauffée.



En conclusion, pour transporter de la vapeur, on le fait à l’état surchauffé alors que pour l’utiliser pour chauffer des procédés on le fait à l’état saturé.

V.Table de la vapeur saturée

Tableau 1 Table de la vapeur saturée

Vapeur saturée					Eau	
P abs. bars	**Temp. vapo-risa-tion °C**	**ρ kg/m^3**	**enthalpie massique Vaporisa-tion kJ/kg**	**enthalpie massique Vapeur kJ/kg**	**Chal. Mas. kJ/kg/°C**	**enthalpie massique Eau liquide kJ/kg**
0,1	45,83	0,0682	2392,9	2584,8	4,1857	191,83
0,2	60,09	0,1307	2358,4	2609,9	4,1846	251,45
0,3	69,12	0,1912	2336,1	2625,4	4,1855	289,3
0,4	75,88	0,2504	2319,2	2636,9	4,1862	317,65
0,5	81,34	0,3086	2305,4	2646	4,1869	340,56
0,6	85,95	0,366	2293,6	2653,6	4,1877	359,93
0,7	89,96	0,4228	2283,3	2660,1	4,1882	376,77
0,8	93,51	0,4792	2274	2665,8	4,1891	391,72
0,9	96,71	0,535	2265,6	2670,9	4,1899	405,21
1	99,63	0,5903	2257,9	2675,4	4,1906	417,51
1,0133	100	0,5977	2256,9	2676	4,1906	419,06
1,2	104,81	0,7003	2244,1	2683,4	4,192	439,36
1,3	107,13	0,7547	2237,8	2687	4,1929	449,19
1,6	113,32	0,9166	2220,9	2696,2	4,195	475,38
1,8	116,93	1,0233	2210,8	2701,5	4,1965	490,7
2	120,23	1,1294	2201,6	2706,3	4,1978	504,7
2,5	127,43	1,392	2181	2716,4	4,2011	535,34
3	133,54	1,6513	2163,2	2724,7	4,2042	561,43
3,6	139,86	1,9596	2144,4	2732,9	4,208	588,53
4	143,62	2,1636	2133	2737,6	4,2102	604,67
4,5	147,92	2,4201	2119,7	2742,9	4,2128	623,16
5	151,84	2,6688	2107,4	2747,5	4,2158	640,12
5,5	155,46	2,9197	2095,9	2751,7	4,2183	655,78
6	158,84	3,1696	2085	2755,5	4,2207	670,42

6,5	161,99	3,4188	2074,7	2758,8	4,2232	684,12
7	164,96	3,667	2064,9	2762	4,2256	697,06
7,5	167,75	3,9185	2055,5	2764,8	4,2283	709,29
8	170,41	4,1615	2046,5	2767,5	4,2306	720,94
8,5	172,94	4,4092	2037,9	2769,9	4,2328	732,02
9	175,36	4,6555	2029,5	2772,1	4,2349	742,64
9,5	177,66	4,902	2020,9	2775	4,2374	752,81
10	179,88	5,1467	2013,6	2776,2	4,2395	762,61
11	184,07	5,637	1998,5	2779,7	4,2437	781,13
12	187,96	6,1275	1984,3	2782,7	4,2479	798,43
13	191,61	6,6181	1970,7	2785,4	4,2519	814,7
14	195,04	7,1073	1957,7	2787,8	4,2559	830,08
15	198,29	7,593	1945,2	2789,9	4,2598	844,67
16	201,37	8,0841	1933,2	2791,7	4,2636	858,56
17	204,31	8,5763	1921,5	2793,4	4,2672	871,84
18	207,11	9,0662	1910,3	2794,8	4,2711	884,58
19	209,8	9,5511	1899,3	2796,1	4,2746	896,81
20	212,37	10,0503	1888,6	2797,2	4,2783	908,59
22	217,24	11,0314	1868,1	2799,1	4,2854	930,95
24	221,78	12,0192	1848,5	2800,4	4,2922	951,93
26	226,04	13,0107	1829,6	2801,4	4,2989	971,72
28	230,05	14,0076	1811,5	2802	4,3055	990,48
34	240,88	17,0271	1760,3	2802,1	4,325	1041,80
38	247,31	19,0694	1728,4	2801,1	4,3375	1072,70
42	253,24	21,1372	1697,8	2799,4	4,35	1101,60
46	258,75	23,2342	1668,3	2797	4,3625	1128,80
50	263,91	25,3614	1639,7	2794,20	4,3746	1154,50

VI.Références

A.Bibliographie

- Carnet du Régleur de J.M. Valance,

- Les techniques de l'ingénieur,

B.Internet

- http://www.chemicalogic.com/,
- http://www.trouvay-cauvin.fr/,
- http://www.processs.com/,
- et tous les sites que vous pouvez partager avec nous...

Remerciements à mon collègue Denis Picard pour avoir bien voulu relire ce document.

N'hésitez pas à me faire part de vos commentaires et éventuels compléments. Ci-jointes mes coordonnées ; si vous le demandez, vous recevrez le fichier original de ce document.

Christophe Alleau

Enseignant de BTS CIRA
Lycée Pilote Innovant
Téléport 5
86130 JAUNAY-CLAN
christophe.alleau@ac-poitiers.fr